

# **FOLIA FORESTALIA** 459

METSÄNTUTKIMUSLAITOS · INSTITUTUM FORESTALE FENNIAE · HELSINKI 1981

---

---

MATTI KÄRKKÄINEN

---

POLTTOPUUN RASIINKAADON JA MUIDEN  
KUIVAUSMENETELMIEN PERUSTEET

---

FOUNDATIONS OF LEAF-SEASONING  
AND OTHER DRYING METHODS OF FUELWOOD

---





METSÄNTUTKIMUSLAITOS  
*THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*

Osoite: Unioninkatu 40 A  
Address: SF-00170 Helsinki 17, Finland

Puhelin: (90) 661 401  
Phone:

Ylijohtaja: <i>Director:</i>	Professori <i>Professor</i>	Olavi Huikari
Yleisinformaatio: <i>General information:</i>	Tiedotuspäällikkö <i>Information Chief</i>	Tuomas Heiramo
Julkaisujen jakelu: <i>Distribution of publications:</i>	Kirjastonhoitaja <i>Librarian</i>	Liisa Ikävalko-Ahvonon
Julkaisujen toimitus: <i>Editorial office:</i>	Toimittaja <i>Editor</i>	Seppo Oja

Metsäntutkimuslaitos on maa- ja metsätalousministeriön alainen vuonna 1917 perustettu valtion tutkimuslaitos. Sen päätehtävänä on Suomen metsätaloutta sekä metsävarojen ja metsien tarkoituksenmukaista käyttöä edistävä tutkimus. Metsäntutkimustyötä tehdään lähes 800 hengen voimin yhdeksällä tutkimusosastolla ja yhdeksällä tutkimus- ja koeasemalla. Tutkimus- ja koetoimintaa varten laitoksella on hallinnassaan valtion-metsiä yhteensä n. 150 000 hehtaaria, jotka on jaettu 17 kokeilualueeseen ja joihin sisältyy kaksi kansallis- ja neljä luonnonpuistoa. Kentäkokeita on käynnissä maan kaikissa osissa.

*The Finnish Forest Research Institute, established in 1917, is a state research institution subordinated to the Ministry of Agriculture and Forestry. Its main task is to carry out research work to support the development of forestry and the expedient use of forest resources and forests. The work is carried out by means of 800 persons in nine research departments and nine research stations. The institute administers state-owned forests of over 150 000 hectares for research purposes, including two national parks and four strict nature reserves. Field experiments are in progress in all parts of the country.*



FOLIA FORESTALIA 459

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1981

Matti Kärkkäinen

POLTTOPUUN RASIINKAADON JA MUIDEN  
KUIVAUSMENETELMIEN PERUSTEET

Foundations of leaf-seasoning and other  
drying methods of fuelwood



ODC 831.1:812.144:812.211:322.2  
ISBN 951-40-0504-X  
ISSN 0015-5543

KÄRKKÄINEN, M. 1981. Polttopuun rasiinkaadon ja muiden kuivausmenetelmien perusteet. Summary: Foundations of leaf-seasoning and other drying methods of fuelwood. *Folia For.* 459:1—15.

Tutkimuksessa kehitetään malli, jota käyttäen voidaan arvioida, kuinka paljon energiaa vähintään kuluu puupolttoaineen kosteuden vuoksi. Samalla voidaan arvioida, kuinka paljon vähintään voidaan uhrata rasiinkaatoon tai muihin kuivausmenetelmiin taloudelliseen tulokseen pyrittäessä. Lähtötietoina ovat muuttuvina tekijöinä savukaasujen lämpötila, puupolttoaineen lämpötila polttoon syötettäessä, kosteussuhde, kuiva-tuoretiheys, lämpöarvo, polttoaineen hinta, polton hyötysuhde sekä luonnonvakioina jään, veden ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetit, jään sulamislämpö ja veden höyrystymislämpö.

Empiiristen tulosten perusteella voidaan arvioida, että rasiinkaato on useissa tapauksissa taloudellisesti perusteltua etenkin silloin, jos samalla voidaan vähentää öljyn kulutusta tukipolttoaineena.

---

A model is developed for estimating the minimum energy loss due to the moisture content of wood fuel. In practice the loss can be higher. The model also gives the highest drying costs which are compensated by the energy increase if the moisture is decreased by leaf-seasoning or other methods of drying. The variables of the model are fuel temperature, flue gas temperature, moisture content of dry weight, basic density, heat value, price of wood fuel, and efficiency in burning. Other factors of the model are the specific heats for ice, water, and steam, melting heat of ice and steaming heat of water.



## SISÄLLYS

1. JOHDANTO .....	4
2. LASKENTAMENETELMÄ .....	5
21. Puupohjainen lämpöenergia .....	5
22. Öljypohjainen energia .....	8
23. Kattilakohtainen malli .....	8
3. HAVAINTOJA RASIINKAADON TALOUDELLISUUDESTA .....	9
4. MALLIN REALISTISUUS .....	10
KIRJALLISUUTTA .....	13
SUMMARY .....	15



## 1. JOHDANTO

Käytettäessä puuta polttoaineena sen kosteutta pyritään usein alentamaan erilaisin toimin. Yleisesti käytetään mm. rasiinkaatoa, jolloin puut kaadetaan ja jätetään karsimattomina kuivumaan lehtien tai neulasten kautta tapahtuvan haihdunnan seurauksena (Jalava 1941, Callin 1945, Heiskanen ja Hakkila 1960, Warsta 1961, Hakkila 1962, Simola ja Mäkelä 1976, Alhojärvi 1981).

Kuivumista tapahtuu myös puutavaraa asianmukaisesti varastoidessa. Puutavara voi olla suurina kappaleina kuten rankoina, pölkkyinä tai halkoina (Heiskanen 1953, 1959, 1961, Immonen 1961 a, Lähteinen 1964, Nisula 1974), tai jopa hakkeena (Taipale 1960 a, b, 1962, Immonen 1961 a, Bergman 1973, Gislerud ja Grønlien 1977, 1978 a, b, Bergman ja Nilsson 1979).

Myös keinollista purun, hakkeen tai pilkkeiden kuivattamista on harrastettu sekä kokeina että käytännön mittakaavassa. Eniten huomiota on kiinnitetty savukaasun käyttöön kuivauksessa (Lillesund 1956, Jokihaara 1958, Vuorelainen 1959, Vilhunen 1962, Isomäki 1963). Puun poltossa savukaasujen tällainen hyödyntäminen on erityisen kiintoisaa, koska savukaasuja on paljon ja ne voidaan jäähdyttää varsin alhaiseen lämpötilaan ilman korroosiovaaraa puun alhaisen rikkipitoisuuden ansiosta (Ling 1975). Myös muita ratkaisuja on esitetty (esim. Siimes 1959, 1960, Aittomäki 1963, 1965, Nisula 1980).

Kuivattaessa puuta polttoainekäyttöä varten oletetaan, että veden määrän alentamisesta aiheutuvat kustannukset saadaan peitettyksi polttoaineen hyödyksi saatavan lämpöenergian kohoamisella. Tuotona voidaan ottaa huomioon myös hakkeen varastoinnin riskien väheneminen (Springer 1979).

Jos kyseessä on jo toimiva laitos, jonka kapasiteetti riittää kaikissa oloissa tyydyttämään lämpöenergian tarpeen, puun suuri kosteus voidaan kompensoida polttamalla sitä vastaavasti enemmän kun kuivaa polttoainetta. Mikäli kyseessä on uuden laitoksen suunnittelu, huomioon on otettava myös investointikustannukset, sillä kuivaa puuta käytettäessä selvittää pienemmällä arinapinta-alalla ja savuhormien mitoituksella kuin kosteampaa polttoainetta käytettäessä (esim. Åström 1978).

Toimivan laitoksen ollessa kyseessä polttoaineen kosteudesta johtuva ylimääräinen polttoaineen määrä voidaan hinnoitella puukustannusten mukaan. Äärimmäisissä tapauksissa (esim. uitetun puun kuori) osa ylimääräisistä polttoainekustannuksista on laskettava polttoöljyn tai muun tukiliekkin polttoaineen mukaan, mikäli märän puun käyttö todella merkitsee tukiliekkikustannusten nousua.

Käsillä olevassa työssä pyritään kehittämään laskentamenetelmä, jota voidaan käyttää apuna arvioitaessa, millä edellytyksillä polttopuiden rasiinkaato, muu kuivumista edistävä toimi tai keinollinen kuivaus on taloudellisesti perusteltua. Tällöin oletetaan, että kyseessä on toimiva laitos, jolloin investointikustannukset voidaan jättää huomiotta. Vastaavanlaisia, joskin eri pohjalta lähteviä malleja, on aiemmin esitetty mm. öljyn ja puun polttoainekäytön vertailemiseksi (esim. Hakkila 1978, Nylander 1979) sekä myös puun kosteuden merkityksen arvioimiseksi (Ince 1977, Nisula 1980, Blankenhorn ja Weyers 1980).

Kuivausmenetelmiä koskevan kirjallisuuden haussa avusti Pekka Alhojärvi, laskennassa Tarja Björklund ja yleisessä toimitustyössä Pirkko Kinanen. Puhtaaksikirjoituksesta huolehtivat Aune Rytkönen ja Raija Siekkinen. Englanninkielen tarkisti L.A. Keyworth. Työn lukivat Pentti Hakkila, Pentti Nisula ja Juhani Salmi. Kiitän avusta.



## 2. LASKENTAMENETELMÄ

### 21. Puupohjainen lämpöenergia

Jos poltettavassa puussa on kosteutta, energiaa kuluu polttoaineen veden lämmittämiseen, höyrystämiseen ja höyryn lämpötilan kohottamiseen. Lisäksi energiaa tarvitaan jäätyneen puun ollessa kyseessä jään lämpötilan kohottamiseen ja sen sulattamiseen. Näin ollen on tiedettävä, kuinka paljon energiaa tarvitaan jään, veden ja höyryn lämpötilan kohottamiseen massan ja lämpötilan yksikköä kohti, ts. jään, veden ja höyryn ominaislämpökapasiteetit. Lisäksi on tiedettävä jään sulamislämpö ja veden höyrystyslämpö massayksikköä kohti. — Muut savukaasuhäviöt voidaan jättää tässä yhteydessä huomiotta, koska niihin ei vaikuta puun kosteus. Niiden osalta ks. **V u o r e l a i n e n** 1961.

Kirjallisuudesta voidaan saada seuraavat määräaoloissa käyttökelpoiset tiedot. Olosuhteet vaikuttavat eniten vesihöyryn ominaislämpökapasiteettiin, joka riippuu paineesta ja lämpötilasta.

Ominaislämpökapasiteetit, kJkg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	Lähde
Jää: 2,09	1)
Vesi: 4,19	1)
Höyry: 1,92 (p = 0, t = 100...200 °C)	2)
Jään sulamislämpö: 332,3 kJkg <sup>-1</sup> (t = 0 °C)	2)
Veden höyrystyslämpö: 2256 kJkg <sup>-1</sup> (t = 100 °C)	2)

1) **Wahlroos** 1980, s. 16.

2) **Tekniikan käsikirja** 1975, osa 2, s. 732, 736.

Tarkastellaan veden massaa m puun tilavuusyksikköä kohti (kgm<sup>-3</sup>). Olkoon kostean puun lämpötila t<sub>1</sub> polttoon syötettäessä ja savukaasujen lämpötila t<sub>2</sub>.

Jos puupolttoaineen kuiva-tuoretiheys on R (kgm<sup>-3</sup>), siinä on vettä tilavuusyksikköä kohti uR, kun u on kosteussuhde kuivasta massasta laskettuna. Olkoon u<sub>1</sub> puun kosteussuhde ilman kosteuden alentamiseksi tarkoitettua tointa ja u<sub>2</sub> puun kosteussuhde alentamistoimen jälkeen. Tällöin veden massa on alentunut puun tilavuusyksikköä kohti (u<sub>1</sub> - u<sub>2</sub>)R (kgm<sup>-3</sup>). Kustannuslasken-

nassa käytettävä veden massa m on siis puupolttoaineen tilavuusyksikköä kohti (u<sub>1</sub> - u<sub>2</sub>)R (kgm<sup>-3</sup>).

Jos t<sub>1</sub> > 0 °C, kosteuden vuoksi kuluva energia E<sub>1</sub> saadaan kaavasta (1) puun tilavuusyksikköä kohti (kJm<sup>-3</sup>).

$$(1) E_1 = R(u_1 - u_2)4,19(100 - t_1) + 2256 + 1,92(t_2 - 100) \quad \text{kJm}^{-3}$$

Jos t < 0 °C, vastaava energia saadaan kaavasta (2).

$$(2) E_2 = R(u_1 - u_2)(2,09(0 - t_1) + 332,3 + 419 + 2256 + 1,92(t_2 - 100)) \quad \text{kJm}^{-3}$$

$$= R(u_1 - u_2)(2,09(0 - t_1) + 3007 + 1,92(t_2 - 100)) \quad \text{kJm}^{-3}$$

Taulukossa (1) on esitetty kaavojen (1) ja (2) avulla laskettuna, millaista energian määrää puun tilavuusyksikköä kohti vastaa kosteussuhteiden u<sub>1</sub> ja u<sub>2</sub> ero puun kuiva-tuoretiheyden R sekä puun lämpötilan t<sub>1</sub> vaihdellessa. Savukaasujen lämpötila on 200 °C. Pitkien lukujen välttämiseksi energia on esitetty megajouleina kuutiometriä kohti. Mikäli savukaasujen lämpötila poikkeaa arvosta 200 °C, tarkempien tulosten saamiseksi on käytettävä kaavaa (1) tai (2) puun syöttölämpötilasta riippuen.

Myöhempiä tarpeita varten on aiheellista määritellä lämpötekijä Z, joka riippuu vain lämpötiloista t<sub>1</sub> ja t<sub>2</sub>. Sen yksikkö on kJkg<sup>-1</sup>. Jos t<sub>1</sub> > 0 °C, se saadaan kaavasta (3), ja jos t<sub>1</sub> < 0 °C, kaavasta (4).

$$(3) Z_1 = 4,19(100 - t_1) + 2256 + 1,92(t_2 - 100) \quad \text{kJkg}^{-1} (t_1 > 0)$$

$$(4) Z_2 = 2,09(0 - t_1) + 3007 + 1,92(t_2 - 100) \quad \text{kJkg}^{-1} (t_1 < 0)$$

Taulukossa 2 on esitetty em. kaavoilla laskettu lämpötekijä Z lämpötilojen t<sub>1</sub> ja t<sub>2</sub> mukaan.

Taulukossa 1 esitetyt luvut osoittavat puun kosteudesta johtuvan nettoenergian tarpeen. Siirrettäessä lämpöä savukaasujen, säteilyn jne. avulla tapahtuu kuitenkin häviöitä, jotka on otettava huomioon myös tarkasteltaessa puussa olevaa kosteutta.



Taulukko 1. Energiämäärä puun tilavuusyksikköä kohti ( $\text{MJm}^{-3}$ ), mikä vastaa kosteussuhteiden  $u_1$  ja  $u_2$  eroa puun kuiva-tuoretiheyden  $R$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ja puun lämpötilan  $t_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) vaihdellessa. Savukaasujen lämpötila on  $200^{\circ}\text{C}$ .

Table 1. Energy per wood volume ( $\text{MJm}^{-3}$ ) corresponding the difference  $u_1 - u_2$  in moisture content of oven dry weight as the basic density of wood ( $R$ ) and temperature of fuel wood ( $t_1$ ) varies. Flue gas temperature is  $200^{\circ}\text{C}$ .

Polttopuun lämpötila Temperature of fuel wood $t_1$ $^{\circ}\text{C}$	Puun kuiva- tuoretiheys Basic density of wood $R$ $\text{kgm}^{-3}$	Kosteussuhteen aleneminen, $u_1 - u_2$ Decrease in moisture content $u_1 - u_2$ 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 Energia $\text{MJm}^{-3}$ — Energy $\text{MJm}^{-3}$							
		0,1	0,2						
-15	300	96,9	193,8	290,7	387,6	484,6	581,5	678,4	775,3
	350	113,1	226,1	339,2	452,2	565,3	678,5	791,4	904,5
	400	129,2	258,4	387,6	516,9	646,1	775,3	904,5	1033,7
	450	145,4	290,7	436,1	581,5	726,8	872,2	1017,6	1162,9
	500	161,5	323,0	484,6	646,1	807,6	969,1	1130,6	1292,1
	550	177,7	355,3	533,0	710,7	888,3	1066,0	1243,7	1421,4
-5	300	96,3	192,6	288,9	385,1	481,4	577,7	674,0	770,3
	350	112,3	224,7	337,0	449,3	561,7	674,0	786,3	898,6
	400	128,4	256,8	385,1	513,5	641,9	770,3	898,6	1027,0
	450	144,4	288,9	433,3	577,7	722,1	866,6	1011,0	1155,4
	500	160,5	320,9	481,4	641,9	802,4	962,8	1123,3	1283,8
	550	176,5	353,0	529,6	706,1	882,6	1059,1	1235,6	1412,2
+5	300	85,4	170,8	256,1	341,5	426,9	512,3	597,7	683,1
	350	99,6	199,2	298,8	398,4	498,1	597,7	697,3	796,9
	400	113,8	227,7	341,5	455,4	569,2	683,1	796,9	910,7
	450	128,1	256,1	384,2	512,3	640,4	768,4	896,5	1024,6
	500	142,3	284,6	426,9	569,2	711,5	853,8	996,1	1138,4
	550	156,5	313,1	469,6	626,1	782,7	939,2	1095,7	1252,3
+15	300	84,1	168,2	252,4	336,5	420,6	504,7	588,9	673,0
	350	98,1	196,3	294,4	392,6	490,7	588,9	687,0	785,2
	400	112,2	224,3	336,5	448,7	560,8	673,0	785,2	897,3
	450	126,2	252,4	378,6	504,7	630,9	757,1	883,3	1009,5
	500	140,2	280,4	420,6	560,8	701,0	841,2	981,5	1121,7
	550	154,2	308,5	462,7	616,9	771,1	925,4	1079,6	1233,8

Taulukko 2. Kaavoilla (3) ja (4) laskettu lämpötekijä  $Z$  puun lämpötilan  $t_1$  ja savukaasujen lämpötilan  $t_2$  mukaan.

Table 2. Warm factor  $Z$  according to the temperature of wood fuel ( $t_1$ ) and flue gas temperature ( $t_2$ ) calculated by equations (3) and (4).

Polttopuun lämpötila Temperature of fuel wood $^{\circ}\text{C}$	Savukaasujen lämpötila $t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) — Flue gas temperature $t_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) 150 175 200 225 250 275 300 325 350 Lämpötekijä $Z$ ( $\text{kJkg}^{-1}$ ) — Warm factor $Z$ ( $\text{kJkg}^{-1}$ )								
	150	175	200	225	250	275	300	325	350
-30	3166	3214	3262	3310	3358	3406	3454	3502	3550
-25	3155	3203	3251	3299	3347	3395	3443	3491	3539
-20	3145	3193	3241	3289	3337	3385	3433	3481	3529
-15	3134	3182	3230	3278	3326	3374	3422	3470	3518
-10	3124	3172	3220	3268	3316	3364	3412	3460	3508
-5	3113	3161	3209	3257	3305	3353	3401	3449	3497
0	3103	3151	3199	3247	3295	3343	3391	3439	3487
+0	2771	2819	2867	2915	2963	3011	3059	3107	3155
+5	2750	2798	2846	2894	2942	2990	3038	3086	3134
+10	2729	2777	2825	2873	2921	2969	3017	3065	3113
+15	2708	2756	2804	2852	2900	2948	2996	3044	3092
+20	2687	2735	2783	2831	2879	2927	2975	3023	3071
+25	2666	2714	2762	2810	2858	2906	2954	3002	3050
+30	2645	2693	2741	2789	2837	2885	2933	2981	3029

Olkoon kattilan hyötysuhde kosteussuhteessa  $u_1$  olevaa puupolttoainetta käytettäessä  $y_1$ . Tällöin taulukossa 1 olevat luvut (E) on jaettava hyötysuhteella bruttoenergian saamiseksi, ts.  $E' = Ey_1^{-1}(kJm^{-3})$ . Jos polttoaineen tehollinen lämpöarvo on  $H_1(kJkg^{-1})$ , tarvitaan em. lämpöenergian saamiseksi puumassa, jonka suuruus on tilavuutta kohti  $Ey_1^{-1}H_1^{-1}(kgm^{-3})$ .

Kun puun kuiva-tuoretiheys oli  $R(kgm^{-3})$ , em. puumäärä on tilavuutena mitaten  $Ey_1^{-1}H_1^{-1}R^{-1}(m^3m^{-3})$ . Jos puupolttoaineen kustannukset ovat lämmönkehittämispäikällä tilavuusyksikköä kohti  $k_1(mk/m^3)$ , em. tilavuus maksaa  $Ey_1^{-1}H_1^{-1}R^{-1}k_1(mk/m^3)$ . Merkitään tätä symbolilla  $K_1$ . Näin ollen jakamalla taulukossa 1 esitetyt luvut (E) hyötysuhteella ( $y_1$ ), lämpöarvolla ( $H_1$ ) ja kuiva-tuoretiheydellä ( $R$ ) sekä kertomalla puun

hinnalla ( $k_1$ ), saadaan kosteussuhteen alentamista ( $u_1 - u_2$ ) vastaava hinta puun hinnalla mitattuna.

Kun tässä tapauksessa kosteuden poistamiseen tarvittava energia tuotetaan puulla, kuiva-tuoretiheyttä ei itse asiassa tarvita laskelmassa. Otetaan huomioon, että

$$(5) E = (u_1 - u_2)RZ \quad (kJm^{-3})$$

Tällöin kuivattamiskustannus  $K_1$  on ( $mk/m^3$ )

$$(6) K_1 = Ey_1^{-1}H_1^{-1}R^{-1}k_1 \\ = (u_1 - u_2)RZy_1^{-1}H_1^{-1}R^{-1}k_1 \\ = (u_1 - u_2)Zy_1^{-1}H_1^{-1}k_1$$

jossa  $Z$  saadaan taulukosta 2 tai kaavoilla (3) ja (4). — Käytännössä laskenta on helppointa kaavalla (6).

Taulukko 3. Kaavalla (6) laskettu korkein kosteussuhteen alenemista  $u_1 - u_2$  vastaava puupolttoaineen kuivatuskustannus  $K$  ( $mk/m^3$ ), mikä on taloudellista maksaa puun lämpötilan ja puukustannusten mukaan. Hyötysuhteeksi on otettu 0,65, puun lämpöarvoksi  $19,5 MJkg^{-1}$  ja savukaasujen lämpötilaksi  $200^\circ C$ .

Table 3. Highest economic drying cost of fuel wood  $K$  ( $mk/m^3$ ) corresponding the decrease in moisture content  $u_1 - u_2$ . Efficiency of burning is 65 per cent, heating value of wood  $19,5 MJkg^{-1}$  and flue gas temperature  $200^\circ C$ .

Polttopuun lämpötila Temperature of fuel wood $^\circ C$	Puukustannus Cost of wood $mk/m^3$	Kosteussuhteen aleneminen $u_1 - u_2$ Decrease in moisture content $u_1 - u_2$							
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
		Korkein kuivatuskustannus $K$ $mk/m^3$ Highest economic drying cost $K$ $mk/m^3$							
- 15	90	2,29	4,59	6,88	9,17	11,47	13,76	16,06	18,35
	100	2,55	5,10	7,65	10,19	12,74	15,29	17,84	20,39
	110	2,80	5,61	8,41	11,21	14,02	16,82	19,62	22,43
	120	3,06	6,12	9,17	12,23	15,29	18,35	21,41	24,47
	130	3,31	6,63	9,94	13,25	16,57	19,88	23,19	26,51
	140	3,57	7,14	10,70	14,27	17,84	21,41	24,98	28,54
	150	3,82	7,65	11,47	15,29	19,11	22,94	26,76	30,58
- 5	90	2,28	4,56	6,84	9,12	11,39	13,67	15,95	18,23
	100	2,53	5,06	7,60	10,13	12,66	15,19	17,72	20,26
	110	2,79	5,57	8,36	11,14	13,93	16,71	19,50	22,28
	120	3,04	6,08	9,12	12,15	15,19	18,23	21,27	24,31
	130	3,29	6,58	9,88	13,17	16,46	19,75	23,04	26,33
	140	3,54	7,09	10,63	14,18	17,72	21,27	24,81	28,36
	150	3,80	7,60	11,39	15,19	18,99	22,79	26,59	30,39
+ 5	90	2,02	4,04	6,06	8,08	10,10	12,13	14,15	16,17
	100	2,25	4,49	6,74	8,98	11,23	13,47	15,72	17,96
	110	2,47	4,94	7,41	9,88	12,35	14,82	17,29	19,76
	120	2,69	5,39	8,08	10,78	13,47	16,17	18,86	21,56
	130	2,92	5,84	8,76	11,68	14,60	17,51	20,43	23,35
	140	3,14	6,29	9,43	12,57	15,72	18,86	22,00	25,15
	150	3,37	6,74	10,10	13,47	16,84	20,21	23,58	26,94
+ 15	90	1,99	3,98	5,97	7,96	9,96	11,95	13,94	15,93
	100	2,21	4,42	6,64	8,85	11,06	13,27	15,49	17,70
	110	2,43	4,87	7,30	9,73	12,17	14,60	17,04	19,47
	120	2,65	5,31	7,96	10,62	13,27	15,93	18,58	21,24
	130	2,88	5,75	8,63	11,50	14,38	17,26	20,13	23,01
	140	3,10	6,19	9,29	12,39	15,49	18,58	21,68	24,78
	150	3,32	6,64	9,96	13,27	16,59	19,91	23,23	26,55



### Esimerkki 1.

Hakkeen kosteussuhde olisi ilman mitään kuivatusta 0,9 (vettä 90 % puun kuivasta massasta) ja rasiinkaadon ansiosta 0,4. Paljonko tämä rasiinkaato saa maksaa kuutiometriä kohti, kun hyötysuhde on 0,65, lämpöarvo  $19500 \text{ kJkg}^{-1}$ , puukustannus lämmönkehittämisaikalla  $120 \text{ mk/m}^3$ , polttoaineen lämpötila  $t_1$   $20^\circ\text{C}$  ja savukaasujen lämpötila  $t_2$   $200^\circ\text{C}$ ?

Kaavasta (3) tai taulukosta 2 saadaan, että lämpötekijä Z on  $2783 \text{ kJkg}^{-1}$ . Kaavalla (6) saadaan kustannuksiksi

$$K_1 = \frac{(0,9 - 0,4) \cdot 2783 \cdot 120}{0,65 \cdot 19500} \frac{\text{kJ} \cdot \text{mk} \cdot \text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kJ}} \\ = 13,17 \text{ mk/m}^3$$

Jos siis rasiinkaato maksaa vähemmän kuin 13,17  $\text{mk/m}^3$ , se kannattaa tehdä, jos kosteussuhde saadaan alenemaan arvosta 0,9 arvoon 0,4 eli 90 %:sta 40 %:iin.

Taulukossa 3 on laskettu kaavalla (6), kuinka paljon puupolttoaineen kuivatus saa maksaa kuutiometriä kohti, kun muuttuvina tekijöinä ovat kosteussuhteen aleneminen, puun lämpötila ja puukustannukset lämmönkehittämisaikalla. Hyötysuhteeksi on otettu 0,65, puun lämpöarvoksi  $19500 \text{ kJkg}^{-1}$  ja savukaasujen lämpötilaksi  $200^\circ\text{C}$ .

## 22. Öljypohjainen energia

Jos puupolttoaine on niin kosteaa, ettei se pala kunnollisesti ilman öljypohjaista tukiliekkiä, ääritapauksessa voidaan kosteussuhteen alentamisesta koituva hyöty hinnoitella säästyvän öljyn eikä säästyvän puun mukaan. Välitapauksissa, jolloin säästetään sekä öljyä että puuta, hinnoittelu tehdään vastaavassa suhteessa.

Olkoon kattilan hyötysuhde öljyä käytettäessä  $y_3$ . Tällöin tarvitaan öljyenergiaa kaavan (5) mukaan  $(u_1 - u_2)RZy_3^{-1} (\text{kJm}^{-3})$ . Jos öljyn lämpöarvo on  $H_3 (\text{kJkg}^{-1})$ , öljyä tarvitaan puupolttoaineen tilavuutta kohti  $(u_1 - u_2)RZy_3^{-1}H_3^{-1} (\text{kgm}^{-3})$ . Öljyn hinnan ollessa  $k_3 (\text{mk/kg})$  kuivattamiskustannus  $K_3$  on öljyn hinnan mukaan laskien

$$(7) K_3 = (u_1 - u_2)RZy_3^{-1}H_3^{-1}k_3 \quad (\text{mk/m}^3)$$

### Esimerkki 2.

Hakkeen kosteussuhde olisi ilman mitään kuivatusta 0,9 ja rasiinkaadon ansiosta 0,4. Paljonko tämä rasiinkaato saa maksaa kuutiometriä kohti, kun kosteuden

alenemisen ansiosta öljyn käytöltä välttyään? Hyötysuhde öljyä käytettäessä on 0,8, öljyn lämpöarvo  $41000 \text{ kJkg}^{-1}$  ja hinta  $1,40 \text{ mk/kg}$ . Puun lämpötila on  $20^\circ\text{C}$  ja savukaasujen lämpötila  $200^\circ\text{C}$ . Kuiva-tuoretiheys on  $450 \text{ kgm}^{-3}$ .

Kaavasta (3) tai taulukosta 2 saadaan lämpötekijän Z arvoksi  $2783 \text{ kJkg}^{-1}$ . Kaavalla (7) saadaan

$$K_2 = \frac{(0,9 - 0,4) \cdot 450 \cdot 2783 \cdot 1,4}{0,8 \cdot 41000} \\ \frac{\text{kg} \cdot \text{kJ} \cdot \text{mk} \cdot \text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{kg} \cdot \text{kJ}} = 26,73 \text{ mk/m}^3$$

Kuivatus saa maksaa siis korkeintaan  $26,73 \text{ mk/m}^3$ .

## 23. Kattilakohtainen malli

Edellä esitetyt mallikehitykset perustuvat olettamukseen, että kosteussuhteesta u riippumatta hyötysuhde on sama puuta polttoaineena käytettäessä. Oletamus voi olla realistinen silloin, kun tarkasteltava kosteussuhteiden ero  $u_1 - u_2$  on suhteellisen pieni. Ellei olettamusta hyötysuhteen vakioisuudesta voida pitää käyttökelpoisena, malli on muutettava toiseen muotoon.

Olkoon kosteussuhteessa  $u_1$  kattilan hyötysuhde  $y_1$  ja kosteussuhteessa  $u_2$  taas  $y_2$ . Olkoon edellisessä tapauksessa poltettavan puun kuiva massa  $m$  (kg) ja tilavuus  $1 \text{ m}^3$ . Olkoon vastaavasti kuiva massa jälkimmäisessä tapauksessa  $m_2$  (kg). Kun puun kuiva-tuoretiheys on  $R (\text{kgm}^{-3})$ , edellinen kuiva massa  $m_1$  on tilavuus yksikköä kohti sama kuin  $R$ .

Kun molempien kosteusteiden puuta poltettaessa pyritään tuottamaan sama energia, saadaan yhtälö (8), jossa  $H_1$  on lämpöarvo  $\text{kJkg}^{-1}$ .

$$(8) m_1y_1H_1 = m_2y_2H_1 \text{ eli } m_1y_1 = m_2y_2$$

Voidaan merkitä siis  $m_2 = m_1y_1y_2^{-1}$ , jolloin massaero  $m_1 - m_2$  on (9)

$$(9) m_1 - m_2 = m_1 - m_1y_1y_2^{-1} \\ = m_1(1 - y_1y_2^{-1}) = R(1 - y_1y_2^{-1})$$

Em. massaero tilavuusyksikköä kohti saadaan tilavuudeksi jakamalla kuiva-tuoretiheydellä  $R$ . Kosteussuhde-eroa  $u_1 - u_2$  vastaava kustannusero  $K_3$  saadaan kertomalla tulos puukustannuksella  $k_1 (\text{mk/m}^3)$  (kaava 10).

$$(10) K_3 = R(1 - y_1y_2^{-1})R^{-1}k_1 \\ = (1 - y_1y_2^{-1})k_1 \quad (\text{mk/m}^3)$$

### Esimerkki 3.

Kosteussuhteella  $u_1$  hyötysuhde on 0,65 ja kosteussuhteella  $u_2$  0,75. Puukustannukset ovat 100 mk/m<sup>3</sup>. Paljonko puun kuivatus saa korkeintaan maksaa?

Kaavalla (10) saadaan

$$K_3 = \left(1 - \frac{0,65}{0,75}\right) \cdot 100 \text{ mk/m}^3 = 13,33 \text{ mk/m}^3$$

Kuivatus saa siis maksaa enintään 13,33 mk/m<sup>3</sup>.

Huomattakoon, että hyötysuhteet kaavassa (10) tarkoittavat sellaisia hyötysuhdelaskelmia, joissa ei ole otettu huomioon polttoaineen sisältämää kosteutta energiasisältöä arvioitaessa. Sopiva ja käytännössä kohtuullisin ponnistuksin selvitettävä hyötysuhdetunnus on esim. tuotettu energiamäärä kulutettua hakemäärää kohti. Tällaisia kokemusperäisiä tunnuksia on joitakin esitetty kirjal-

lisuudessa (esim. Savela 1980), eikä niiden selvittämisen pitäisi tuottaa vaikeuksia ainakaan keskisuurilla ja suurilla laitoksilla (Vorelainen 1961, s. 11).

### Esimerkki 4.

Polttaessa laatikollinen kosteussuhteen  $u_2$  omaavaa haketta saatiin energiaa 18 MJ. Kun hakkeen kosteussuhde oli  $u_1$ , laatikollisesta haketta saatiin energiaa vain 14 MJ. Paljonko kannattaa uhrata tämän hakkeen kuivaamiseen tasolle  $u_2$ , kun puukustannukset ovat 100 mk/m<sup>3</sup>?

Kaavalla (10) saadaan tässä tapauksessa

$$K_3 = \left(1 - \frac{14}{18}\right) \cdot 100 \text{ mk/m}^3 = 22,22 \text{ mk/m}^3$$

Kuivatus saa siis maksaa enintään 22,22 mk/m<sup>3</sup>.

## 3. HAVAINTOJA RASIINKAADON TALOUDELLISUUDESTA

Kun hakkeen polttoainekäyttöön tunnettiin edellisen kerran suurempaa kiinnostusta 1960-luvun alussa, rasimenetelmää käytettiin vain vähän eräistä hajatiedoista päätellen (esim. Kantola 1964). Nykyisin rasimenetelmän osuus on noin puolet keskisuurissa lämpölaitoksissa (Eronheimo 1980, Heikka 1980) ja yleinen ilmeisesti myös maatiloilla ja pienkiinteistöissä (Mäkelä ja Simsiö 1977, Hakkila ja Kalaja 1981). Rasimenetelmää voidaan käyttää myös pitkälle koneellistetuissa menetelmissä leikkuuhakurimenetelmää lukuun ottamatta (Hakkila ja Mäkelä 1975, Hakkila ja Kalaja 1980).

Eri lähteiden mukaan saadaan perinteisellä rasiinkaadolla, jolloin puut ovat toisistaan erillään kuivumisen ajan, rungon alkuperäinen kosteussuhde 0,8...1,2 (80...120 %) alenemaan selvästi, kaikista suotuisimmissa oloissa puun syiden kyllästymispisteen (n. 0,3) lähelle tai jopa sen alapuolelle. Heikoimmissa tapauksissa kuivuminen jää vähäiseksi.

Lehtipuut ja kuusi kuivuvat yleensä hyvin, mänty huomattavasti heikommin. Kokopuuhake jää kosteammaksi kuin rankahake, koska puun tyviosa kuivuu parhaiten ja sen osuus on suurempi rangasta kuin puusta.

Toistaiseksi ei ole runsaita tutkimustuloksia kosteuden alenemisesta rasiinkaatomenetelmässä, jossa puut kasataan pieniin muodostelmiin kaadon yhteydessä. Tämä siirtelykaatomenettelmä on erityisen käyttökelpoinen pienikokoisen puuston kokopuu-haketusta varten (ks. Lehtonen 1976). Voi kuitenkin olettaa, että huomattavaa kuivumista tapahtuu myös tällöin erityisesti päällimmäisten puiden hyvän kuivumisen vuoksi. Eräissä tapauksissa on jopa havaittu, että puut kuivuvat kasoissa paremmin kuin levällään (Simola ja Mäkelä 1976). Syynä lienee aluskasvillisuuden vaikutus. Mainittakoon myös, että hakkuutähde kuivuu pienissä kasoissa varsin hyvin (Mäkelä 1977). Kuivumisen tehokkuudesta suurissa kasoissa ja pinomuodostelmissa ei ole vielä tutkimustuloksia.

Yleisesti ottaen voidaan olettaa, että mänty ehkä lukuun ottamatta kosteussuhde saadaan alenemaan rasiinkaadolla 0,3...0,6 yksikköä (30...60 prosenttiyksikköä) verrattuna siihen, mikä vallitsee tuoreista puista tehdyssä hakkeessa lyhyen varastoinnin jälkeen.

Ovatko sitten taulukossa 3 esitetyt korkeimmat sallitut rasiinkaadon kustannukset suurempia kuin mitä käytännössä syntyy? Tämähän on edellytys rasiinkaadon (tai



muun kuivatuksen) taloudellisuudelle.

Tutkimuksiin perustuvaa tuoretta tietoa ei ole olemassa. Siirtelykaatoon perustuvan rasimenetelmän osalta on kuitenkin selvää, että toiminta on aina taloudellista: varsinaisia kustannuksia ei synny siitä, että metsäkuljetus tehdään vasta 1...3 kuukauden kuluttua kaadosta eikä välittömästi. Näin ollen taulukon 3 luvut osoittavat suoraan sen vähimmäissäästön, joka menetelmän käyttämisellä saavutetaan.

Jos käytetään perinteistä rasiinkaatoa, jolloin puut karsitaan kuivumisen jälkeen ja rangat kasataan samalla kasoihin, ylimääräisiä kustannuksia saattaa syntyä verrattuna tilanteeseen, että karsinta tehdään kaadon yhteydessä. Tämä johtuu siitä, että puunkorjuuta tehdään rasimenetelmässä kahteen otteeseen. Lisäksi saattavat kuivuneet oksat olla työskentelyn kannalta hankalampia kuin tuoreet oksat. Toiseen suuntaan taas vaikuttaa kosteuden alenemisesta aiheutuva puutavaran keveneminen.

Ilmeisesti rasiinkaadon aiheuttamat lisäkustannukset eivät ole suuret. Tähän viittaavat mm. vanhat *Levanon* (1961, 1964) tulokset, joiden mukaan rasimenetelmässä ajanmenekki oli vain vähän suurempi kuin vaihtoehtoisissa menetelmissä. Kustannuslisä oli tuona aikana niin vähäinen, että jo kaukokuljetuskustannusten aleneminen saattoi korvata sen (*Hakkila* 1963, *Kautia* 1963).

Tuoreita aikatutkimustuloksia ei ole käy-

tettävissä. Olettaa kuitenkin sopii, ettei kulunut kaksikymmenvuotiskausi ole olennaisesti muuttanut tilannetta: on edelleen luultavaa, ettei rasimenetelmän metsävaihe merkitse olennaista kustannuslisää, joka olisi suurempi kuin taulukossa 3 esitetyt luvut kosteussuhteen alenemisen arvoilla 0,3...0,6.

Pientä lisäkustannusta saattaa tosin syntyä sen vuoksi, että kuivan puun haketus vaatii enemmän energiaa kuin tuoreen puun. Vaikutus ei ole kuitenkaan suuri (*Murtto* 1951). Osa energiasta saadaan sitä paitsi talteen hakkeen kuivumisen muodossa, joka tuoreella puulla voi olla 1...2 prosenttiyksikön suuruusluokkaa (*Immonen* 1961 b). Sitä paitsi haketuksen vaatima energia on jo suuruusluokaltaan vähäinen (esim. *Hakkila* ja *Kalaja* 1981: n. 1,0...1,2 kWh/m<sup>3</sup>).

Syntyneitä lisäkustannuksia kompensoivat edut hakkeen kuljetuksessa: kuivempi hake on kevyempää eikä se jäädy säiliöön yhtä herkästi.

Jonkinlaiseksi kustannuslisäksi on havupuiden osalta katsottava myös rasimenetelmän aiheuttama lisääntynyt hyönteistuhoriski (*Hakkila* ym. 1975). Hinta-arvioita ei ole tiettävästi esitetty. Mahdollisia ovat myös rasimenetelmän suuremmat pölyhaitat työntekijöille. Tähän viittaavat haketettavan raaka-aineen kuivumisen vaikutusta koskevat tulokset (*Kurvinen* ja *Harstela* 1980).

#### 4. MALLIN REALISTISUUS

Puun kosteudesta aiheutuvat energiahäviöt on tässä tutkimuksessa laskettu olettaen, että vesi on helposti poistettavissa puusta. Näin ollen tulokset eivät sovellu tilanteeseen, jolloin kosteussuhde olisi puun syiden kyllästymispisteen alapuolella (noin 0,3). Puun syiden kyllästymispistettä alhaisemmissa kosteuksissa energiaa tarvitaan nimittäin tavanomaista enemmän kosteuden poistamiseksi puusta (*Skaar* 1972, s. 128, *Shelton* 1976, s. 91). Tämä pätee luonnollisesti myös hakkeen kuivauksessa ennen polttoa (esim. *Siimes* 1959).

Käytännössä em. rajoituksesta ei ole haittaa, sillä tavanomaisin metsätaloudessa käytettävien menetelmin puun kosteutta ei yleensä saada puun syiden kyllästymispistettä alhaisemmaksi. Vähäiset poikkeamat eivät ole olennaisia (esim. kosteussuhde 0,20...0,25), sillä tarvittava energia kasvaa vain hitaasti puun syiden kyllästymispisteen läheisyydessä (*Skaar* 1972, s. 128). Lisäksi käytännössä haketta ei saa kuivata liian pitkälle mm. räjähdysvaaran kasvaessa kattilassa (*Åström* 1978).

Olennaista virhettä ei aiheudu myöskään

siitä, että soluonteloissa olevaan veteen vaikuttavat kapillaarivoimat, jotka vaikuttavat energiatasoon. Tämä ilmenee mm. Skaarin (1972, s. 23) julkaisemasta taulukosta, jonka mukaan virhe voidaan havaita vain tarkoilla mittauksilla.

Perusmalli perustuu olettamukseen, että ainoa kosteuden vaikutus on sen suoranaisesti aiheuttama energiahäviö. Käytännössä ainakin suuri puuaineen kosteus saattaa vaikuttaa myös epäsuorasti, jolloin on käytettävä mitattuihin hyötysuhteisiin perustuvaa mallia. Hyvän palamisen varmistamiseksi joudutaan kosteaa polttoainetta käytettäessä kohottamaan ilmakerointia (lisäämään vetoa) (esim. Johnson 1975), jolloin energiahäviöt lisääntyvät ylimääräisen ilman jäädyttyä kattilaa. Suuremmista kaasumääristä johtuen palo-kaasujen viipymä polttolaitteessa kuitenkin lyhenee, ja näin ollen savukaasut poistuvat määrätehoon pyrittäessä sitä kuumempina, mitä kosteampaa polttoaine on (esim. Polttihakkeen... 1963). Tunnettua myös on, että pikeytyminen on kostealla polttoaineella runsasta mm. liekin lämpötilan alenemisen vuoksi. Tätä lisää myös pienkattiloiden epätydyttävä tehonsäätöperiaate (Soll 1980, s. 97).

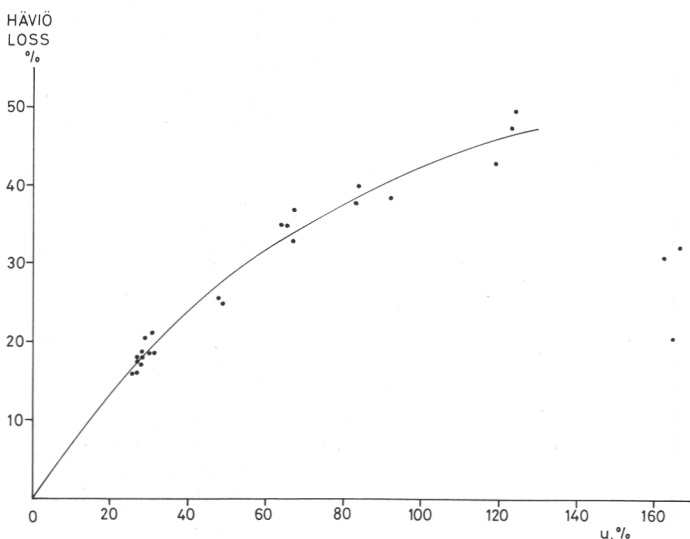
Epäsuorien vaikutusten selvittämiseksi perehdyttiin lukuisiin kattilatutkimuksiin, joissa oli mitattu hyötysuhde ja erilaiset häviöt puupolttoainetta käytettäessä. Tuloksia ei voitu kuitenkaan käyttää suoraan,

koska eurooppalaisen käytännön mukaisesti hyötysuhde oli laskettu puun sellaisesta tehollisesta lämpöarvosta, jossa kosteuden vaikutus oli otettu huomioon vähentämällä kuivan puun tehollisesta lämpöarvosta puussa olevan veden höyrystymislämpöä vastaava energia (ks. esim. Olsson 1975). Veden vaikutukseksi jäi näin ollen vain lämmittämistä ja höyryn tulistamisesta aiheutunut vaikutus. Tällöin oli saatu tuloksia, joiden mukaan hyötysuhde ei juuri riippunut puun kosteudesta lukuunottamatta poikkeuksellisen mäkää puuta, jolloin palaminen jo vaikeutui.

Kattiloiden vertailun kannalta tällainen käytäntö saattaa olla paikallaan, mutta kosteuden todellisesta vaikutuksesta se antaa virheellisen kuvan.

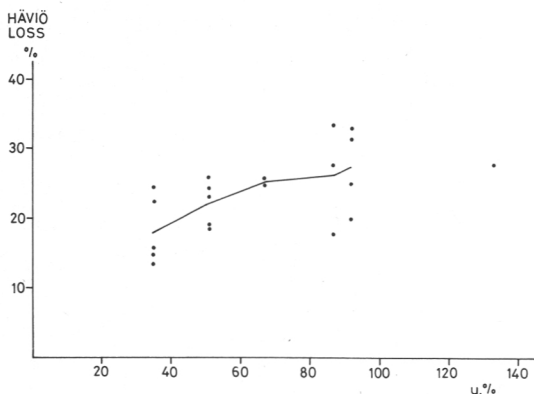
Muutamissa tutkimuksissa oli kuitenkin esitetty tietoja alkuperäisistä mittauksista niin runsaasti, että tulokset voitiin laskea uudelleen. Tässä tapauksessa käytettiin Vuorelaisen ja Uotilan (1960, 1962) tutkimuksia. Laskentamenetelmä oli seuraava.

Ilmoitettu poltossa käytetty puun tuore massa muunnettiin kuivaksi massaksi ilmoitetun kosteuden avulla. Sen lämpöenergia (kuivan puun tehollinen lämpöarvo) laskettiin ottamalla huomioon, että kuivan lämpöarvo on noin  $19,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Tästä saatiin bruttoenergia. Kattilasta saatu nettoenergia oli ilmoitettu. Erotus oli kokonaishäviö. Veden lämmittämiseen, höyrystämiseen ja tulistamiseen kulunut energia laskettiin selvittämällä kosteuden avulla puussa olleen veden määrä. Kun koehuoneen ilman lämpötila oli tiedossa, samoin savukaasujen lämpötila, saatiin lasketuksi aiemmin esitetyllä tavalla veden vuoksi kulunut energia.



Kuva 1. Puun kosteudesta aiheutuvan energiahäviön osuus puun kosteussuhteen mukaan. Alkuperäiset havainnot saatiin Vuorelaisen ja Uotilan (1962) tutkimuksesta.

Fig. 1. Energy loss due to the moisture of wood in per cent of the total energy loss. Original observations were obtained from the study of Vuorelainen and Uotila (1962).



Kuva 2. Puun kosteudesta aiheutuvan energiahäviön osuus puun kosteussuhteen mukaan. Alkuperäiset havainnot saatiin Vuorelaisen ja Uotilan (1960) tutkimuksesta.

Fig. 2. Energy loss due to the moisture in wood in per cent of the total energy loss. Original observations were obtained from the study of Vuorelainen and Uotila (1960).

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty, kuinka monta prosenttia kokonaishäviöstä aiheutui polttoaineen kosteudesta erällä kattiloilla. Kummassakin tapauksessa riippuvuus oli hidastuvasti käyräviivainen. Tämä osoittaa, että epäsuora veden vaikutus lisääntyi polttoaineen kosteussuhteen kasvaessa. Jos muut häviölajit olisivat pysyneet samoina, tuloksena olisi ollut origon kautta kulkeva suora.

Käyräviivaisuus ei ole kuitenkaan olennaisen suuri aivan poikkeuksellisen märkää haketta lukuun ottamatta. Voidaan näin ollen päätellä, että varsin laajalla kosteusalueella laskentalogiikka on onnistunut käytännöllisiä tarpeita varten.

On kuitenkin ilmeistä, että lineaarisuus riippuu voimakkaasti kattilan rakenteesta. Jos kyseessä on niin huonosti suunniteltu kattila, että sen jossakin osassa saavutetaan helposti savukaasun kastepiste, nämä pinnat pikeytyvät voimakkaasti. Tällöin syntyy suuria häviöitä sekä pikeytymisen itsensä vuoksi (ts. kun polttoaine ei pala täydellisesti, vaan tervä-aineet tiivistyvät kattilan pinnoille) että heikomman lämmön siirtymisen vuoksi.

Kattiloiden suurista eroista on lukuisia havaintoja. Esim. Vuorelaisen ja Uotilan (1962) tutkimalla kattilalla voimakasta pikeytymistä oli vasta silloin, kun polttopuun kosteussuhde oli yli 1,6 (160 %) (kuva 1). Heikosti suunnitelluissa kattiloissa pikeytyminen on ollut vaikea on-

gelma jo kosteussuhteen ollessa alle 1,0 (100 %) (Tuomi 1980).

Edellä olevan perusteella voidaan päätellä, että perusmallia voidaan käyttää järkevästi vain liikuttaessa pikeytymisrajan alapuolella olevissa kosteuksissa. Pikeytymisraja on kattilakohtainen ja riippuu myös sen käyttötavasta, mm. paluuvien lämpötilasta, kuten erityisesti Wahlroos (1980) on korostanut. Muissa tapauksissa on käytettävä luvussa 23 esitettyä mallia, joka edellyttää hyötysuhteiden mittaamista puun eri kosteuspitoisuuksissa.

Epäsuorista vaikutuksista johtuu, että tässä työssä esitetyt korkeimmat sallitut kuivatuskustannukset ovat käytännössä korkeintaan oikeita tai yleensä todellisuutta alhaisempia kaikilla kattilatyypeillä ja -merkeillä. Tavanomainen varovaisuusperiaate tulee siis hyvin otetuksi huomioon. Esitettyjä lukuja voi siis turvallisesti käyttää: ne eivät ole missään tapauksessa liian suuria, vaan minimiarvoja.

Epätarkkuutta sisältyy malliin kuitenkin myös toiseen suuntaan. Kattilan suunnittelusta riippuen puupolttoaine saattaa olla myös liian kuivaa, jolloin hyötysuhde alenee. Tällaisesta on esimerkkejä (esim. Heliovaara 1958). Olennaista merkitystä tällä tuskin lienee, sillä puun kuivattaminen liian alhaiseen kosteuteen vaatii niin paljon energiaa, ettei siihen jouduttane muulloin kuin poikkeuksellisesti.

Toiseen suuntaan käyvää epätarkkuutta on myös siinä, että vesihöyryn säteilykyky on kuivaa savukaasua suurempi (Eranti 1959). Kun säteily on merkittävä energian siirtomuoto kattilaoiloissa, ilmiöllä saattaa olla pientä merkitystä kosteuden haitallisen vaikutuksen alentamisessa. Olennaista merkitystä tällä ilmiöllä ei kuitenkaan liene siitä kertovien raporttien vähälukuisuudesta päätellen.

Tiettyä epämääräisyyttä sisältyy mallin parametreihin. Jopa luonnonvakioiden numeroarvoista voidaan keskustella, vaikka niin ei ehkä olettaisi olevan. Tärkein ratkaisu on se, että veden höyrystymislämmöksi otettiin 2256 kJ/kg<sup>-1</sup>. Tämä on veden höyrystymislämpö normaali-ilmanpaineessa ja 100 °C lämpötilassa. Lukuisissa muissa esityksissä vastaavaksi arvoksi on otettu 2450 kJ/kg<sup>-1</sup>, kun on tarkasteltu puussa olevan kosteuden vaikutusta lämpöarvoon (esim.



Olofsson 1975). Tämä on veden höyrystymislämpö 20 °C lämpötilassa.

Vaikka tiettyjen standardien noudattamisella voidaankin perustella lämpötilan 20 °C käyttöä, se on epärealistinen puun polttamista ajatellen. Epäilemättä osa vedestä höyrystyy jo 20 °C lämpötilassa, mutta toisaalta osa vasta yli 100 °C lämpötilassa, kun vesi ei ennätä poistua havupuilla trakeideista ja lehtipuilla kauempana pinnasta olevista putkilon osista alemmissa lämpö-

tiloissa. Mahdollisesti höyrystymislämpö 2256 kJkg<sup>-1</sup> ei vastaa tarkasti poltto-oloissa keskimääräistä arvoa, mutta parempaakaan arvoa ei ole esitetty.

Höyryn ominaislämpökapasiteetti 1,92 kJkg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> saattaa olla todellisia kattilaolosuhteita ajatellen liian korkea arvo, koska se pätee normaali-ilmanpaineessa. Ilmeisesti lievää alipainetta koskeva arvo olisi kuitenkin realistisempi. Käytännöllistä merkitystä erolla ei kuitenkaan voi olla.

## KIRJALLISUUTTA

- AITTOMÄKI, S. 1963. Tutkimuksia polttohakkeen ja pilkkeiden kuivauksesta ulkoilman avulla. Pienpuualan Toimik. Julk. 151:1—38.
- 1965. Tutkimuksia sahajauhon kuivaamisesta ulkoilman avulla. Summary: Studies of the drying of sawdust by means of surrounding air. Pienpuualan Toimik. Julk. 174:1—64.
- ALHOJÄRVI, P. 1981. Rasiinkaadolla kuivempaa polttopuuta. Teho (1):31—33.
- BERGMAN, Ö. 1973. Lagring av bränsleflis. Summary: Storage of fuel chips. Rapp. Instn. Virkeslära Skogshögsk. 85:1—70.
- & NILSSON, T. 1979. An experiment on outdoor storage of whole-tree chips. Rapp. Instn. Virkeslära Sveriges Lantbruksuniv. 109:1—21.
- BLANKENHORN, P.R. & WEYERS, R.E. 1980. Moisture effects on an energy balance developed for using forest biomass as a fuel. For. Prod. J. 30(11):41—46.
- CALLIN, G. 1945. Syrfällning och randbarkning av björkkol ved. Norrl. SkogsvFörb. Tidskr. :135—152.
- EERONHEIMO, O. 1980. Metsähakkeen hankinta ja käyttö metsäteollisuudessa. Metsäteknologian laudaturtyö Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksella. Julkaisematon. 59 s.
- ERANTI, M.O. 1959. Palamisen automatisointi puuta polttavissa höyry- ja vesikattilalaitoksissa. Summary: Automatic combustion control of wood burning steam and water boilers. Pienpuualan Toimik. Julk. 83:1—31.
- GISLERUD, O. & GRØNLIEN, H. 1977. Lagring av heltreflis. Summary: Storage of whole-tree chips. Rapp. NISK Skogteknol. Avd. 1/77:1—34.
- & GRØNLIEN, H. 1978 a. Lagring av heltreflis av or. Summary: Storage of whole-tree chips of grey alder. Rapp. NISK Skogteknol. Avd. 1/78:1—36.
- & GRØNLIEN, H. 1978 b. Lagring av lauvtrefflis. Rapp. NISK Skogteknol. Avd. 9/78:1—77.
- HAKKILA, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Summary: Forest seasoning of wood intended for fuel chips. Commun. Inst. For. Fenn. 54(4):1—82.
- 1963. Koivupinotavaran rasiinkaadosta. Pienpuualan Toimik. Tied. 93:1—3.
- 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Summary: Harvesting small-sized wood for fuel. Folia For. 342:1—38.
- & KALAJA, H. 1980. Harvesting fuel chips with the Pallari swath harvester. Seloste: Polttopuun korjuu Pallarin leikkuuhakkurilla. Folia For. 418:1—24.
- & KALAJA, H. 1981. KOPO-palahakejärjestelmä. Summary: KOPO block chip system. Folia For. 467.
- , KALAJA, H. & MÄKELÄ, M. 1975. Kokopuunkäyttö pienpuuongelman ratkaisuna. Summary: Full-tree utilization as a solution to the problem of small-sized trees. Folia For. 240:1—78.
- & MÄKELÄ, M. 1975. Pallarin vesakkoharvesteri. Summary: Pallari bushharvester. Folia For. 249:1—18.
- HEIKKA, T. 1980. Metsähakkeen hankinta ja polttoainekäyttö keskisuurissa laitoksissa. Metsäteknologian laudaturtyö Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksella. Julkaisematon. 116 s.
- HEISKANEN, V. 1953. Polttopuiden kuivumisesta ja sen huomioon ottamisesta varastoinnissa. Summary: On the drying of firewood and on its consideration in storing. Commun. Inst. For. Fenn. 41(4):1—48.
- 1959. Halkaistun, aisatun ja kuorellisen koivupinotavaran kuivuminen ja säilyminen metsävarastossa. Summary: Drying and storage decays of forest-stored split, strip-barked, and unbarked birch cordwood. Commun. Inst. For. Fenn. 50(7):1—63.
- 1961. Tutkimuksia koivuhalkojen painosta ja kosteudesta. Summary: Studies on the weight and moisture of split birch fuelwood. Silva Fenn. 108(2):1—30.
- & HAKKILA, P. 1960. Polttohakepuun kuivumisen rasissa. Pienpuualan Toimik. Tied. 17:1—6.
- HELIÖVAARA, T. 1958. Selostus Lokomo OY:n valmistamista puulämmityslaitteista ja niillä suoritetuista kokeiluista. Pienpuualan Toimik. Julk. 66:1—11.
- IMMONEN, V. 1961 a. Hakkeen varastointia ja halkojen laatua koskevia tutkimuksia Turenkin sokeritehtaalla v. 1958 ja 1959. Summary: Studies of the storage of chips and quality of split fuelwood at Turenki sugar mill in 1958 and 1959. Pienpuualan Toimik. Julk. 96:1—30.
- 1961 b. Orientoivia tietoja uiton ja lastutuksen vaikutuksesta puun kosteuteen. Pienpuualan Toimik. Tied. 48:1—9.
- INCE, P.J. 1977. Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents. U.S. For. Serv. For. Prod. Lab. Gen. Tech. Rep. FPL-13:1—9.

- ISOMÄKI, O. 1963. Puujätteiden poltosta ja poltto-laitteista. Pienpuualan Toimik. Tied. 91:1—11.
- JALAVA, M. 1941. Rasiin kaadettujen puiden kuivumisesta. Metsät. Aikak. 58(6):173—176.
- JOHNSON, R.C. 1975. Some aspects of wood waste preparation for use as a fuel. Tappi 58(7):102—106.
- JOKIHAARA, L. 1958. Havaintoja haketta käyttävis-tä lämpökeskuksista Norjassa ja Ruotsissa. Pien-puualan Toimik. Tied. 9:1—16.
- KANTOLA, M. 1964. Pienpuurankojen korjuu maa-tilametsistä. Summary: The harvesting of small-diameter long logs from farm forests. Pienpuu-alan Toimik. Julk. 157:1—72.
- KAUTIA, E. 1963. Tutkimuksia puupolttoainetta käyttävistä lauhdevoimalaitoksista. Summary: Studies of condensating steam power plants using wood for fuel. Pienpuualan Toimik. Julk. 91:1—47.
- KURVINEN, P. & HARSTELA, P. 1980. Haketustyön ergonomia ja työn järjestely. Summary: Ergonomics and work organizing of chipping work. Folia For. 437:1—25.
- LEHTONEN, E. 1976. Pienpuun kaato moottori- ja raivaussahoihin perustuvilla laitteilla. Summary: Felling of small-size trees with felling devices based on the chain saw and clearing saw. Folia For. 261:1—27.
- LEVANTO, S. 1961. Tutkimuksia 2-metrinen koivu-polttopuun hakkuusta kesällä sekä rasiinkaatoa käytettäessä. Summary: Studies on summer felling and preparation of 2-metre birch fuelwood. Pien-puualan Toimik. Julk. 130:1—54.
- 1964. Tutkimuksia koivupaperipuun hakkuusta palstatiin varten rasiinkaatoa käytettäessä. Summary: Investigations into cutting birch pulp-wood alongside the striproad, and leaving the trees after felling to season with the tops intact. Pienpuualan Toimik. Julk. 165:1—74.
- LILLESUND, F. 1956 (orig.). Eidsvollin meijerin hakkeenkuivatus ja noenerotuslaitteet. Pienpuu-alan Toimik. Julk. 78:1—9.
- LING, C.H. 1975. Förbränningsanstalter för trä-bränsle. Rapp. Instn. Skogsteknik Skogshögsk. 85:1—58.
- LÄHTEINEN, O. 1964. Sahalaitoksen jätepuusta las-tutettu polttohake hankinnan varmuusvarastona. Pienpuualan Toimik. Tied. 114:1—22.
- MURTO, J.O. 1951. Selluloosapuun lastutus III. Summary: The chipping of pulp wood III. Teoll. Keskuslab. Tied. 68:1—29.
- MÄKELÄ, J. & SIMSIÖ, M. 1977. Puun korjuu ja käyttö hakkeena maatiloilla. Summary: Harvesting and use of wood as chips on Finnish farms. Työteho-seuran Metsätied. 280:1—7.
- MÄKELÄ, M. 1977. Hakkuutähteen ominaisuuksien muuttuminen. Summary: Changes in the quality of logging residues. Folia For. 309:1—16.
- NISULA, P. 1974. Makroilmaston vaikutus varastoi-dun pinotavaran painoon. Summary: Effect of macroclimate on the weight of stored cordwood. Folia For. 218:1—23.
- 1980. Näkökohtia polttohakkeen kuivaamisesta. Abstract: Aspects of the drying of fuel chips. Folia For. 440:1—14.
- NYLINDER, M. 1979. Relationstal träbränslen — olja. Summary: Conversion factors fuelwood — oil. Rapp. Instn. Virkeslära Sveriges Lantbruksuniv. 110:1—51.
- OLOFSSON, L. 1975. Värmevärden för olika delar av tall, gran och björk. Summary: Heating values for different parts of pine, spruce and birch. Rapp. Uppsats. Instn. Skogsteknik 90:1—47.
- Polttohakkeen määrittely, mittaus ja hinnoittelu. Hakenormitoimikunnan ehdotus. 1963. Summary: Definition, measurement and pricing of fuel chips. Recommendations of an expert committee. Pien-puualan Toimik. Julk. 147:1—27.
- SAVELA, A. 1980. Polttohaketta valtion laitoksille. Teho (3):8—9.
- SHELTON, J. 1976. The woodburners encyclopedia. Section one: wood as energy. Vermont Crossroads Press. Waitsfield. 126 s.
- SIIMES, F.E. 1959. Yhteenveto VTT:llä 1959 suori-tetusta hakkeen kuivaustutkimuksesta. Pienpuualan Toimik. Tied. 44:1—9.
- 1960. Sahanpurun kuivaus. Kirjallisuuspoimintoja. Pienpuualan Toimik. Julk. 104:1—42.
- SIMOLA, P. & MÄKELÄ, M. 1976. Rasiinkaato kokopuiden korjuussa. Summary: Leaf-seasoning method in whole-tree logging. Folia For. 273:1—18.
- SKAAR, C. 1972. Water in wood. Syracuse wood science series 4. Syracuse University Press. New York. 218 s.
- SOLLI, S. (toim.) 1980. Fyring med ved of brenselflis for gårder og småhus. Landbruksforlaget. Oslo. 142 s.
- SPRINGER, E.L. 1979. Should whole-tree chips for fuel be dried before storage? U.S. For. Serv. For. Prod. Lab. Res. Note FPL-0241:1—5.
- TAIPALE, A. 1960 a. Tutkimuksia polttohakkeen varastoinnista. Summary: Studies of the storage of fuel chips. Pienpuualan Toimik. Julk. 100:1—47.
- 1960 b. Hakkeen varastointikokeita. Pienpuualan Toimik. Tied. 13:1—5.
- 1962. Sahanhakkeen kuivuminen avokeossa ja kate-tussa varastossa. Summary: Seasoning of chips made of sawmill waste in uncovered stack and covered stack. Pienpuualan Toimik. Julk. 141:1—27.
- Tekniikan käsikirja. Osa 2: Yleiset perusteet. 1975. 777 s.
- TUOMI, S. 1980. Hakkeen palakoon ja kosteuden vai-kutus lämmityskattilan tehoon ja hyötysuhteeseen. Teho (7—8):34—36.
- WAHLROOS, L. 1980. Kotimaiset polttoaineet ja keskuslämmityskattilat. 2. tarkistettu ja laajennettu painos. Energiakirjat Ky. Pori. 372 s.
- WARSTA, O. 1961. Rasiin kaadetun koivun ja lepän kuivumisesta. Pienpuualan Toimik. Tied. 43:1—8.
- VIITANIEMI, E. 1965. Katsaus kuorenkuivauslait-teisiin. Pienpuualan Toimik. Julk. 173:1—44.
- VILHUNEN, P. 1962. Purun kuivaus. Pienpuualan Toimik. Tied. 61:1—4.
- VUORELAINE, O. 1959. Hakkeenpolton viimeaikai-sesta kehityksestä. Pienpuualan Toimik. Julk. 74:1—7.
- 1961. Savukaasuhäviöiden laskenta täydellisessä ja epätäydellisessä palamisessa. Summary: Calculation of the flue-gas losses at the complete and incomplete combustion. Pienpuualan Toimik. Julk. 133:1—41.
- & UOTILA, V.O. 1960. Tutkimus LAKA-keskus-lämmityskattilasta. Pienpuualan Toimik. Tied. 38:1—15.
- & UOTILA, V.O. 1962. Tutkimus ruuvisyöttöi-sestä Termis 21—80 hakekattilasta. Pienpuualan Toimik. Tied. 79:1—9.
- ÅSTRÖM, L. 1978. Puun polton taloudellisuus ja tekniikka. Puunpolttopäivät Helsinki 1978-11-01. Moniste. 6 s.

## SUMMARY

### FOUNDATIONS OF LEAF SEASONING AND OTHER DRYING METHODS OF FUELWOOD

The excessive moisture content of wood decreases the usable energy. In practice this energy loss due to the moisture is compensated by the larger use of fuel, i.e. the cost of the moisture can be seen in the greater consumption of wood. In some cases the moisture can increase even the consumption of oil if the fuel is so wet that the burning is impossible without additional fuel.

In this paper three models are developed for assessing the minimum costs that can be put on the drying of wood fuel. In the first model it is assumed that the energy loss due to the moisture is compensated by the greater use of wood fuel. In the second model the moisture is compensated by the use of oil. In the third model the compensation is based on wood, but the assumptions are different from those of the first model.

For the first two models the following symbols are used.

$u_1$  = the ratio between the mass of water and mass of oven-dry wood, without drying of wood (in green wood 0,8...1,2, as a rule)

$u_2$  = the ratio between the mass of water and mass of oven-dry wood, after the drying of wood (as low as 0,2...0,3 in favourable conditions outdoors)

$R$  = basic density of wood,  $\text{kgm}^{-3}$

$t_1$  = temperature of wood when put in for burning  $^{\circ}\text{C}$

$t_2$  = temperature of flue gas,  $^{\circ}\text{C}$

The *minimum* energy loss corresponding the difference in moisture content  $u_1 - u_2$  can be computed using Equation (1) (p. 5) (if the temperature  $t_1$  is above  $0^{\circ}\text{C}$ ) or Equation (2) (p. 5) (if the temperature  $t_1$  is under  $0^{\circ}\text{C}$ ). These equations were derived on the basis of the specific heats of ice ( $2,09 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), water ( $4,19$ ), and steam ( $1,92$ ), and in addition using the melting heat of ice ( $332,3 \text{ kJkg}^{-1}$ ) and steaming heat of water ( $2256 \text{ kJkg}^{-1}$ ).

Some numerical values have been computed on Table 1 (p. 6).

Equations (1) and (2) and Table 1 show the minimum energy loss due to the moisture. When this energy is obtained by using more wood as a fuel, Equation (6) can be used to compute the costs corresponding the difference  $u_1 - u_2$ . In the equation,  $y_1$  is the efficiency in burning (as a rule 0,5...0,8),  $H_1$  is the effective heat value of dry wood ( $18...21 \text{ MJkg}^{-1}$ ) and  $k_1$  the cost of fuelwood (in Finland  $100...150 \text{ FIM/m}^3$  solid measure).

Example.

$u_1 = 0,9$  (i.e. the moisture content is 90 % of oven-dry weight)

$u_2 = 0,4$  (i.e. the moisture content is 40 % of oven-dry weight, for example after seasoning)

$y_1 = 0,65$  (quite normal efficiency in wood burning)

$H_1 = 19500 \text{ kJkg}^{-1}$

$k_1 = 120 \text{ FIM/m}^3$

$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$

$t_2 = 200^{\circ}\text{C}$

Using equation (3) or Table 2 one can see that  $Z = 2783 \text{ kJkg}^{-1}$ . Using Equation (6) one obtains the maximum drying cost  $13,17 \text{ FIM/m}^3$ . If the drying costs less than  $13,17 \text{ FIM/m}^3$ , it is profitable. — In practice the costs can be even higher as only the direct effects of water are taken into account.

In Table 3 some numerical values of costs computed by Equation (6) are presented.

If oil is used instead of additional wood, Equation (7) can be used. In the equation,  $y_3$  is the efficiency in burning oil,  $H_3$  its heat value ( $\text{kJkg}^{-1}$ ), and  $k_3$  cost of oil ( $\text{FIM/kg}$ ).

Example.

$u_1 = 0,9$

$u_2 = 0,4$

$y_3 = 0,8$

$H_3 = 41000 \text{ kJkg}^{-1}$

$k_3 = 1,40 \text{ FIM/kg}$

$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$

$t_2 = 200^{\circ}\text{C}$

$R = 450 \text{ kgm}^{-3}$

The maximum drying cost of wood fuel is according to Equation (7)  $26,73 \text{ FIM/m}^3$  when oil is used.

The models presented above can be used when only the direct effects of moisture content are taken into account. If the moisture  $u_1$  is very high even the indirect effects of moisture should be taken into account (excessive pyrolytic compounds which are not burned etc.). The composite of the direct and indirect effects can be seen in the efficiency figures which correspond the moisture content  $u_1$  and  $u_2$ . The maximum drying cost can be computed using Equation (10) (p. 8) where  $y_1$  is the efficiency corresponding the moisture content  $u_1$  and  $y_2$  the efficiency corresponding the moisture content  $u_2$ . As earlier,  $k_1$  is the cost of fuelwood ( $\text{FIM/m}^3$ ).

Example.

If  $y_1 = 0,65$ ,  $y_2 = 0,75$  and  $k_1 100 \text{ FIM/m}^3$ , the maximum cost in drying is  $13,33 \text{ FIM/m}^3$ .

When the results computed by the models were compared with the actual costs of drying wood fuel it was found that at least leaf-seasoning and other low-cost drying methods are highly profitable in practice especially if their usage can decrease the consumption of oil. In all cases the burning of wet wood should be avoided from the economic point of view.





ODC 831.1:812.144:812.211:322.2  
ISBN 951-40-0504-X  
ISSN 0015-5543

KÄRKKÄINEN, M. 1981. Polttopuun rasiinkaadon ja muiden kuivausmenetelmien perusteet. Summary: Foundations of leaf-seasoning and other drying methods of fuelwood. Folia For. 459:1—15.

A model is developed for estimating the minimum energy loss due to the moisture content of wood fuel. In practice the loss can be higher. The model also gives the highest drying costs which are compensated by the energy increase if the moisture is decreased by leaf-seasoning or other methods of drying.

Author's address: The Finnish Forest Research Institute, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

ODC 831.1:812.144:812.211:322.2  
ISBN 951-40-0504-X  
ISSN 0015-5543

KÄRKKÄINEN, M. 1981. Polttopuun rasiinkaadon ja muiden kuivausmenetelmien perusteet. Summary: Foundations of leaf-seasoning and other drying methods of fuelwood. Folia For. 459:1—15.

A model is developed for estimating the minimum energy loss due to the moisture content of wood fuel. In practice the loss can be higher. The model also gives the highest drying costs which are compensated by the energy increase if the moisture is decreased by leaf-seasoning or other methods of drying.

Author's address: The Finnish Forest Research Institute, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

Tilaa kortin kääntäpuolelle merkitsemäni julkaisut (julkaisun numero mainittava).

*Please, send me following publications (add numbers of the publications on the backside of the card).*

Nimi  
Name

\_\_\_\_\_

Osoite  
Address

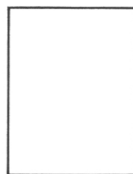
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Metsäntutkimuslaitos  
Kirjasto/Library  
Unioninkatu 40 A  
SF-00170 Helsinki 17  
FINLAND





# METSÄNTUTKIMUSLAITOS

## THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE

### Tutkimusosastot — *Research Departments*

Maantutkimusosasto  
*Department of Soil Science*

Suontutkimusosasto  
*Department of Peatland Forestry*

Metsänhoidon tutkimusosasto  
*Department of Silviculture*

Metsänjalostuksen tutkimusosasto  
*Department of Forest Genetics*

Metsänsuojelun tutkimusosasto  
*Department of Forest Protection*

Metsäteknologian tutkimusosasto  
*Department of Forest Technology*

Metsänarvioimisen tutkimusosasto  
*Department of Forest Inventory and Yield*

Metsäekonomian tutkimusosasto  
*Department of Forest Economics*

Matemaattinen osasto  
*Department of Mathematics*

### Metsäntutkimusasemat — *Research Stations*

Parkanon tutkimusasema  
*Parkano Research Station*  
Os. — *Address:* 39700 Parkano, Finland  
Puh. — *Phone:* (933) 2912

Muhoksen tutkimusasema  
*Muhos Research Station*  
Os. — *Address:* 91500 Muhos, 1 kp, Finland  
Puh. — *Phone:* (981) 431 404

Suonenjoen tutkimusasema  
*Suonenjoki Research Station*  
Os. — *Address:* 77600 Suonenjoki, Finland  
Puh. — *Phone:* (979) 11 741

Punkaharjun jalostuskoeasema  
*Punkaharju Tree Breeding Station*  
Os. — *Address:* 58450 Punkaharju, Finland  
Puh. — *Phone:* (957) 314 142

Ojajoen koeasema  
*Ojajoki Experimental Station*  
Os. — *Address:* 12700 Loppi, Finland  
Puh. — *Phone:* (914) 40 356

Kolarin tutkimusasema  
*Kolari Research Station*  
Os. — *Address:* 95900 Kolari, Finland  
Puh. — *Phone:* (995) 61 401

Rovaniemen tutkimusasema  
*Rovaniemi Research Station*  
Os. — *Address:* Eteläranta 55  
96300 Rovaniemi 30, Finland  
Puh. — *Phone:* (991) 15 721

Joensuun tutkimusasema  
*Joensuu Research Station*  
Os. — *Address:* c/o Joensuun korkeakoulu  
c/o Joensuu University  
PL 111  
80101 Joensuu 10, Finland  
Puh. — *Phone:* (973) 28 311

Ruotsinkylän jalostuskoeasema  
*Ruotsinkylä Tree Breeding Station*  
Os. — *Address:* 01590 Maisala, Finland  
Puh. — *Phone:* (90) 824 420



- No 447 Uusvaara, Olli: Pelkkahakkureilla tehdyn hakkeen ja sahatavaran pinnan laatu.  
Quality of chips and surface of sawn timber made by chipper headrigs.
- No 448 Vuokila, Yrjö: Kasvatustiheyden vaikutus istutuskuusikon kasvuun ja tuotokseen.  
The dependence of growth and yield on the density of spruce plantations in Finland.
- No 449 Kinnunen, Kaarlo & Mäki-Kojola, Sakari: Männyn luontaisesta uudistumisesta Pohjois-Satakunnassa.  
Natural regeneration of Scots pine in western Finland.
- No 450 Isomäki, Antti & Väisänen, Jarmo: Harvennustavan vaikutus kasvatettavaan puustoon ja harvennuskertymään.  
Thinning method and its influence on the remaining growing stock and on the thinning yield.
- No 451 Varmola, Martti: Männyn istutustaimistojen ulkoinen laatu. The external quality of pine plantations.
- No 452 Roiko-Jokela, Pentti: Maaston korkeus puuntuotantoon vaikuttavana tekijänä Pohjois-Suomessa.  
The effect of altitude on the forest yield in northern Finland.
- No 453 Pohtila, Eljas & Timonen, Mauri: Suojametsäalueen viljelytaimikot ja niiden varhaiskehitys.  
Scots pine plantations and their early development in the protection forests of Finnish Lapland.
- No 454 Gustavsen, Hans Gustav: Talousmetsien kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla.  
Site index curves for conifer stands in Finland.

- No 455 Salminen, Marja-Liisa: Kuormatraktorin kuljettajan kuormittumisen arviointi psykofysiologisilla menetelmillä.  
Evaluation of the strain on the forwarder driver with the help of some psychophysiological methods.
- No 456 Raitio, Hannu: Pääravinlannoituksen vaikutus männyn neulasten rakenteeseen ja ravinnepitoisuuksiin ojitetulla lyhytkorsinevalla.  
Effect of macronutrient fertilization on the structure and nutrient content of pine needles on a drained short sedge bog.
- No 457 Huttunen, Terho: Suomen piensahat 1980.  
Small sawmills in Finland, 1980.
- No 458 Kärkkäinen, Matti & Salmi, Juhani: Länsi-Uudenmaan rannikon mäntytykkien ominaisuudet eräällä sahalaistoksella.  
Properties of pine logs in a coastal sawmill in southern Finland.
- No 459 Kärkkäinen, Matti: Polttopuun rasiinkaadon ja muiden kuivausmenetelmien perusteet.  
Foundations of leaf-seasoning and other drying methods of fuelwood.
- No 460 Metsätilastollinen vuosikirja 1980.  
Yearbook of Forest Statistics, 1980.
- No 461 Raulo, Jyrki & Lähde, Erkki: Rauduskoivun kylvökokeita Lapissa.  
Sowing experiments with *Betula pendula* in Finnish Lapland.
- No 462 Raulo, Jyrki & Rikala, Risto: Istutettujen männyn, kuusen ja rauduskoivun taimien alkukehitys eri tavoin käsitellyllä viljelyalalla.  
Initial development of Scots pine, Norway spruce and silver birch seedlings planted on a forestation site prepared in different ways.
- No 463 Hyppönen, Mikko: Eräiden metsikönkasvatusvaihtoehtojen edullisuus metsähallituksen Pohjois-Suomen metsissä.  
Profitability of some stand growing alternatives in the State forests of northern Finland.
- No 464 Harstela, Pertti & Piirainen, Kimmo: Esitutkimus PIKA 75 harvesterin automaatioasteen vaikutuksista tuotokseen, mittaustarkkuuteen ja kuljettajan kuormittumiseen.  
Output, accuracy of measuring and strain of the driver at three automation levels of PIKA 75 harvester. A pilot study.
- No 465 Huttunen, Terho: Suomen puunkäyttö, poistuma ja metsätase 1978—80.  
Wood consumption, total drain and forest balance in Finland, 1978—80.
- No 466 Harstela, Pertti & Tervo, Leo: Pitkän puutavaran esijuonto vinttureilla ja hevosella.  
Bunching of timber by winches and horse.
- No 467 Hakkila, Pentti & Kalaja, Hannu: KOPO palahakejärjestelmä.  
KOPO block chip system.
- No 468 Vuokila, Yrjö: Nuoren männikön kasvureaktio ensiharvennuksen jälkeen.  
The growth reaction of young pine stands to the first commercial thinning.
- No 469 Rummukainen, Ukko & Voipio, Pekka: Ahavan tuhot kuusentaimissa Suonenjoen taimitarhalla keväällä 1978.  
Winter wind damage on Norway spruce seedlings at Suonenjoki seedling nursery in spring 1978.
- No 470 Hallaksela, Anna-Maija & Nevalainen, Seppo: Juurikäävän torjunta urealla kuusenkannoissa.  
Control of root rot fungus (*Heterobasidion annosum*) by treating Norway spruce stumps with urea.

Metsäntutkimuslaitoksen julkaisusarjoja, Communicationes Instituti Forestalis Fenniae ja Folia Forestalia, koskevat yksittäiskappaleilaukset ja vaihtotarjoukset osoitetaan laitoksen kirjastolle. Tiedonantomonisteita koskevat pyynnöt osoitetaan ao. tutkimusosastolle tai -asemalle.  
Subscriptions concerning single copies of the publications, as well as exchange offers, can be addressed to the Library of the Institute.